한국농림기상학회지, 제6권 제3호(2004)
*Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 6, No. 3, (2004), pp. 164~169

# 지형기후모형에 근거한 서리경보시스템 구축

**정유란 · 서희철 · 윤진일**
경희대학교 생태시스템공학과/생명자원과학연구원
(2004년 8월 16일 접수; 2004년 8월 28일 수락)

# Site - Specific Frost Warning Based on Topoclimatic Estimation of Daily Minimum Temperature

**Uran Chung, Hee-Cheol Seo and Jin I. Yun**
*Department of Ecosystem Engineering, Kyung Hee University, Suwon, Korea*
(Received August 16, 2004; Accepted August 28, 2004)

**ABSTRACT**

**A spatial interpolation scheme incorporating local geographic potential for cold air accumulation (TOPSIM) was used to test the feasibility of operational frost warning in Chatancheon basin in Yeoncheon County, where the introduction of new crops including temperate zone fruits is planned. Air temperature from April to June 2003 was measured at one-minute intervals at four locations within the basin. Cold-air accumulation potentials (CAP) at 4 sites were calculated for 3 different catchment scales : a rectangular area of 65 × 55 km which covers the whole county, the KOWACO (Korea Water Corporation) hydrologic unit which includes all 4 sites, and the sub-basins delineated by a stream network analysis of the digital elevation model. Daily minimum temperatures at 4 sites were calculated by interpolating the perfect prognosis (i.e., synoptic observations at KMA Dongducheon station) based on TOPSIM with 3 different CAPs. Mean error, mean absolute error, and root mean square error were calculated for 45 days with no precipitation to test the model performance. For the 3 flat locations, little difference was detected in model performance among 3 catchment areas, but the best performance was found with the CAPs calculated for sub-basins at one site (Oksan) on complex terrain. When TOPSIM loaded with sub-basin CAPs was applied to Oksan to predict frost events during the fruit flowering period in 2004, the goodness of fit was sufficient for making an operational frost warning system for mountainous areas.**

*Key words* : **Frost warning, Minimum temperature, Spatial interpolation, Cold air drainage, Topography**

## I. 서 언

봄철 늦서리는 과수재배농가에 치명적인 피해를 끼칠 수 있다. 기후변화에 따른 이상난동현상으로 개화시기가 앞당겨지는 최근의 생물계절 추세는 향후 더 잦은 서리피해를 전망케 하며 그 대책 마련이 시급하게 되었다(Chmielewski *et al.*, 2004). 영년생인 과수는 재배적지 여부에 따라 피해빈도가 크게 달라져 잘못 선정된 과원은 상습피해지가 될 가능성이 높다. 우리나라처럼 복잡한 지형에 재배규모가 작은 곳에서는 기후자원의 정밀 심층분석을 통한 과원 적지선정 시스템이 반드시 필요하다. 일단 조성된 과수 주산단지인 경우 일 최저기온 예보를 활용한 과원 서리경보시스템의 실시간 운영 역시 매우 유용할 것이다.

서리 발생 기작 가운데 한랭 기단의 대규모 이류에 의한 것보다 복사냉각에 의한 경우가 종관적인 예측이 더 어렵다. 복사냉각에 의한 국지적인 서리발생을 예측하고 피해 위험지를 판정하기 위해 주로 쓰이는 방

Corresponding Author : Jin I. YUN(jiyun@khu.ac.kr)

법은 지형특성의 정량화인데(Bootsma, 1976; Laughlin and Kalma, 1987; Lindkivist *et al.*, 2000), 적지 판정의 목적으로는 실용성이 있지만 서리경보시스템으로 이용하기에는 미흡한 점이 많다. 이를 보완하기 위해 일부 과원에는 기온의 역전강도에 따라 상하공기를 자동으로 혼합해주는 방상팬의 보급이 이루어지고 있지만 넓은 지역을 대상으로 실시하기에는 그 비용이 만만치 않다.

복사냉각일의 최저기온 공간변이의 대부분은 찬 공기 집적 및 온난대 효과를 기존의 고도보정 내삽모형에 추가한 지형기후모형(TOpography - based Spatial Interpolation Model: TOPSIM)에 의해 해석할 수 있다(Chung *et al.*, 2002). 이 때 기온 결정에 가장 유효한 찬 공기 유입범위는 반경 50 - 70m 범위(1 - 2 ha)로 알려졌다(Chung *et al.*, 2003). 이 모형을 이용하면 이론 상 어느 지역이건 정밀 수치고도모형(digital elevation model: DEM)을 토대로 인근 기상관서의 당일 기온일교차 관측값과 익일 아침 최저기온 예보값으로부터 지역 내 최저기온의 공간변이를 정밀하게 추정할 수 있다. 하지만 이 모형을 검증실험지역인 경남 하동군 만지 과원지대를 벗어나 다른 곳에 적용해서 실용적인 서리경보시스템을 구축한 사례는 아직 보고되지 않았다. 예를 들어 하동지역에서 계산된 찬 공기 집적량은 사방 2.1km의 정방형 구역에 적용해서 얻어졌지만, 타 지역에 적용할 경우 2.1km의 정방형뿐만 아니라 불규칙한 행정구역 혹은 집수역(watershed) 등으로 그 공간규모가 달라질 수 있다. 이럴 경우 흐름계산의 결과는 당초 2.1km 정방형 구역에 비해 달라질 수 있으며 최종 기온추정에 어떤 영향을 미칠지는 미지수이다.

본 연구는 임의 지역에서 찬 공기 흐름의 계산범위를 달리했을 때 예상되는 기온추정값의 신뢰성을 검증하고, 그 결과를 근거로 서리경보시스템을 구축할 경우 실용성 여부를 검토하기 위해 수행하였다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 대상 지역 및 기온 측정

경기도 연천군 차탄천 유역 4개 과원 후보지에 기온 관측장비를 설치하여 2004년 4월 1일부터 6월 30일까지 1분 간격으로 연속 측정하였다(Fig. 1). 사용된

**Fig. 1.** Map of the study area with locations of temperature observation.

센서는 로거 일체형 써미스터(Model HOBO H8 Pro, Onset Computer Corporation, U.S.A.)로서 제작사의 사양에 의하면 측정오차가 -30°C에서 +50°C 범위에서 ±0.5°C이며, 상온에서의 정확도는 ±0.2°C이다. 4개 관측지점의 위치좌표를 위성측위계(Model GeoExplorer III 및 Pathfinder 2.80, Trimble Inc., U.S.A.)에 의해 측정하고 기준국(인천 팔미도)의 보정값으로 후처리하여 정확한 위치좌표를 얻었다.

### 2.2. 지점별 찬 공기 집적량 계산

기상 관측지점에 유입되는 냉기 집적량의 계산범위를 3 종류로 두었다. 첫째는 연천군 행정구역을 완전히 포함하는 65 x 55km 장방형 지역으로서 국토지리정보원의 25,000 : 1 지형도 6 도엽으로 이루어진다. 이 지역은 한국수자원공사에서 제정한 840개 남한지역 수문단위지도(Hydrologic Unit : HU) 가운데 8개 수문단위와 중첩된다. 둘째는 이들 8개 수문단위 가운데 4개 관측지점을 모두 포함하는 차탄천 수문단위(HU102214)를 냉기 계산범위로 하였다. 셋째는 HU102214를 차수분석에 의해 좀더 세밀하게 획정한 소수역(catchment area)으로서 본 연구에서는 소수문단위(Sub-Hydro Unit : SHU)로 명명하였다. 4개 관측지점 가운데 2개는 같은 SHU에, 나머지 둘은 각각 다른 SHU에 속하는 것으로 판정되었다(Fig. 1).

각 관측지점의 냉기 집적량을 환경부에서 제공한 30m DEM을 이용하여 이들 세 가지 계산범위에 대해 계산하였다. 선행 연구(Chung *et al.*, 2003)에서 최저기온 추정에 가장 효과적인 면적으로 밝혀진 셀 중심으로부터 반경 75m 범위의 냉기 집적량을 평활화하였다(Fig. 2; Table 1).

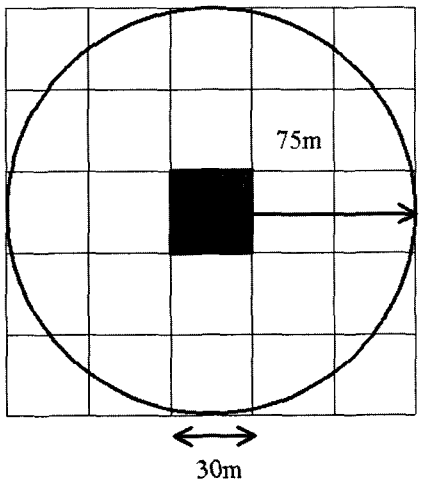


**Fig. 2.** A schematic description of the cell-based calculation and smoothing for the cold-air accumulation potential. Smoothing is done for the flow accumulation values of surrounding cells falling in the circle of 75-m radius from the center of the 30-m grid cell.

### 2.3. 최저기온 추정

수집된 동두천 기상대 일 최저기온자료에, 기온관측지점의 표고와 동두천 기상대의 표고 간 편차를 감안한 표준대기 기온감율(-0.0065C/m)을 적용하여 4 지점의 기온을 추정하고 이를 고도보정기온으로 두었다. 이것이 현재 관행적으로 사용되는 기온추정법이다. 앞서 만들어 둔 평활화 냉기집적량 자료로부터 각 기상관측지점의 찬 공기 집적량을 발췌하고 그 상용대수를 적용한 냉기침강 보정을 실시하였다. Chung *et al.*(2003)에 의하면 주변으로부터 유입되는 찬 공기 집적량(grid cell 단위)에 따른 최저기온의 하강폭은 1,000 cell에서 3°C, 100 cell이면 2°C, 그리고 10 cell이면 최고 1°C이다.

총 91일간 기온 관측자료 가운데 인근 동두천 기상대의 관측자료를 근거로 하여 강우가 없었던 45일간 자료만 분석대상으로 하였다.

**Table 1.** Topography and the flow accumulation potential of 4 observation sites.

| Station ID | Elevation (m) | Slope (%) | Aspect | FA1 (logFA1) | FA2 (logFA2) | FA3 (logFA3) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Chatan4 | 56 | 3 | N | 5 (0.68) | 5 (0.68) | 5 (0.68) |
| Doshin | 74 | 2 | NW | 24 (1.37) | 24 (1.37) | 24 (1.37) |
| Oksan | 63 | 1 | S | 28,222 (4.45) | 31,867 (4.50) | 3,295 (3.52) |
| Chatan2 | 98 | 11 | N | 24 (1.38) | 23 (1.36) | 23 (1.36) |

FA : Flow accumulation(1 : 65x55km, 2 : HU, 3 : SHU )
logFA : common logarithm of FA

**Table 2.** Temperature estimation errors as influenced by the catchment area for calculation of the potential flow accumulation.

| Station ID | Error Type | Control (elevation correction) | Cold-air correction | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | RECT | HU | SHU |
| Oksan | ME | 1.73 | −1.31 | −1.20 | −0.56 |
| | MAE | 1.75 | 1.39 | 1.29 | 0.74 |
| | RMSE | 1.99 | 1.49 | 1.39 | 0.88 |
| Doshin | ME | 1.40 | 0.49 | 0.49 | 0.49 |
| | MAE | 1.59 | 0.84 | 0.84 | 0.84 |
| | RMSE | 1.35 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| Chatan2 | ME | 0.86 | −0.03 | −0.03 | −0.03 |
| | MAE | 0.88 | 0.33 | 0.33 | 0.33 |
| | RMSE | 0.76 | 0.33 | 0.33 | 0.33 |
| Chatan4 | ME | 0.71 | 0.26 | 0.26 | 0.26 |
| | MAE | 0.80 | 0.46 | 0.46 | 0.46 |
| | RMSE | 0.74 | 0.50 | 0.50 | 0.50 |

## III. 결과 및 고찰

### 3.1. 집수역의 크기에 따른 최저기온 추정신뢰도

45일간 자료를 토대로 평균오차(mean error : ME), 평균절대오차(mean absolute error : MAE), 그리고 평균평방근오차(root mean square error : RMSE)를 계산하여 비교한 것이 Table 2이다. 지점별로 오차의 크기는 조금씩 다른데 관행방법(고도보정)에 의한 추정기온의 오차는 대체로 찬 공기 집적량이 많은 곳에서 더 커진다. 찬 공기 보정법을 쓸 경우 전반적으로 오차의 크기는 대폭 줄어드는데 특히 지형이 상대적으로 복잡한 옥산리에서는 집수역의 크기가 작아질수록 더욱 정확해지는 경향이다. 평탄지인 나머지 3곳에서는 그 영향이 없었다.

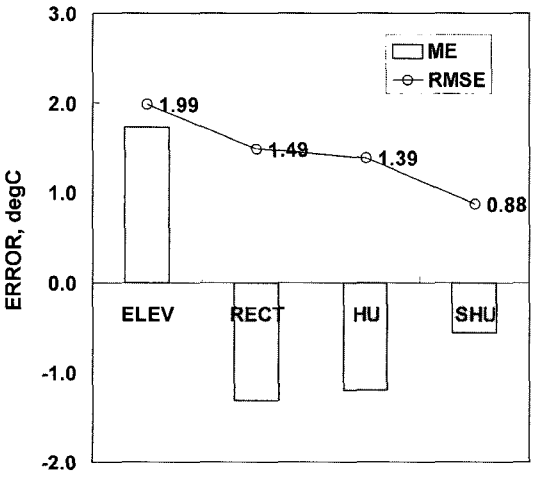


**Fig. 3.** Influence of the catchment area on the mean error (ME) and the root mean square error (RMSE) of daily minimum temperature estimation at Oksan site.

집수역의 크기에 따른 오차감소효과가 인정되는 옥산리의 자료만 추려서 집수역 크기별로 ME와 RMSE를 비교한 것이 Fig. 3이다. ME의 경우 관행의 고도보정법으로는 과다추정 쪽으로 편기되지만 냉기보정법으로는 과소추정 쪽으로 편기된다. 고도보정의 경우 옥산리의 지형에 의해 생기는 찬 공기의 집적을 전혀 고려하지 않으므로 당연히 실측 기온보다 높게 추정하는 것이다. 냉기보정의 경우 강우가 없는 45일 중에서 흐리거나 강풍이 부는 날은 모형계산만큼 기온이 떨어지지 않을 수 있기 때문에 실제보다 더 낮게 추정되는 경우가 생긴 것이다. 그러나 SHU 규모에서는 이것도 크게 줄어들었다. RMSE를 비교할 경우 SHU 규모 냉기보정의 탁월성이 더욱 뚜렷해져서 고도보정의 절반 이하인 0.88°C로 개선됨을 알 수 있다.

2004년 4월과 5월 중 옥산리의 최저기온이 5°C 이하였던 12일간에 대하여 SHU 규모 냉기보정방법에

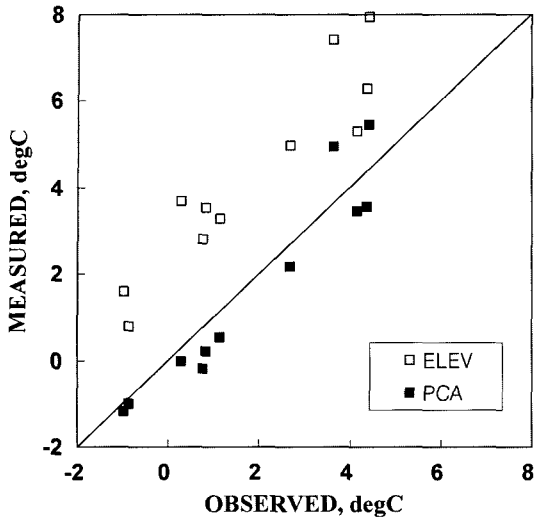


**Fig. 4.** Goodness of fit for the minimum temperature estimated by the potential cold-air accumulation (PCA) and the conventional elevation correction (ELEV). Selected data at Oksan site for days with minimum temperature below 5°C in spring 2004.

의해 추정한 기온을 고도보정법에 의한 기온추정값과 비교한 것이 Fig. 4이다. 고도보정에 의한 추정값은 전체 범위에서 실측기온보다 2°C 가량 높은 값을 보이지만 냉기보정에 의한 추정값은 거의 일치하며, 특히 실측기온이 낮아질수록 더욱 정확해지는 경향이다. 이처럼 서리피해가 우려되는 저온영역에서의 높은 신뢰도는 이 방법이 실용적인 서리경보시스템 구축의 기반이 될 수 있음을 암시한다.

### 3.2. 서리경보시스템 시연

Kim *et al.*(2004)에 의하면 연천지역의 배 신고품종 개화기는 4월 중순 - 5월 상순으로 이 시기에 서리가 내리면 상해를 입게 된다. 기온과 서리와의 관계를 고려하여 3°C이하일 때부터 피해 위험이 발생한다는 가정 하에 냉기보정방법에 의한 서리피해 경보의 가능성을 타진하였다. 먼저 초기 입력에 필요한 기상관서 예보자료의 경우, 인근 동두천기상대에서 발표하는 익일 최저기온 예보를 사용해야겠지만 예보자료 대신 본 연구에서는 동두천기상대에서 실제 관측된 일 최저기온값을 사용하였다. 예보값이 관측값과 동일하다는 것은 100% 적중의 완전예보(perfect prognosis)를 말한다. 이렇게 하면 예보값 자체의 오차에서 발생하는 분석상의 noise를 사전에 제거함으로써 연구에서 목적으로 하는 처리 간 차이를 보다 명확히 검출할 수 있다.

이 기간 중 동두천기상대 관측노장에서 3°C 이하로 기온이 떨어진 날은 4일이었지만 옥산리 과원지대에서는 3일이 많은 7일이었다(Table 3). 만약 과수농가에서 기상청 발표에 의존해서 상해 대비를 한다면 대상지역 내 과원 중 옥산리와 같이 찬 공기 집적이 심한 곳에서는 이 기간 중 3번 정도 경고 없이 서리피해를

**Table 3.** Daily minimum temperature at the Oksan site estimated by the potential cold-air accumulation (PCA) correction on days with minimum temperature under 5°C in spring 2004. Calculation of cold-air accumulation potential was done for 3 different catchment area: 65 × 55km rectangle (RECT), Hydrologic Unit (HU), Sub-basin derived from HU(SHU). Control is the conventional method using elevation-correction only. Synoptic observation is from KMA Dongducheon station.

| Date | Observed Temperature | | | Estimated Temperature | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Synoptic | On-site | Control | RECT | HU | SHU |
| April 15 | 4.3 | 0.3 | 3.7 | −1.2 | −1.1 | −0.0 |
| 16 | 7.8 | 3.6 | 7.4 | 4.1 | 4.3 | 4.9 |
| 21 | 6.8 | 4.4 | 6.3 | 2.7 | 2.8 | 3.6 |
| 23 | 7.5 | 4.2 | 5.3 | 2.9 | 3.0 | 3.5 |
| 24 | 2.1 | −1.0 | 1.6 | −2.1 | −2.0 | −1.2 |
| 25 | 2.8 | 1.1 | 3.3 | −0.3 | −0.2 | 0.6 |
| 28 | 0.9 | −0.9 | 0.8 | −1.6 | −1.5 | −1.0 |
| 29 | 2.9 | 0.8 | 2.8 | −1.2 | −1.0 | −0.2 |
| May 5 | 4.9 | 2.7 | 5.0 | 1.3 | 1.4 | 2.2 |
| 6 | 7.7 | 4.4 | 7.9 | 4.6 | 4.8 | 5.5 |
| 7 | 3.4 | 0.8 | 3.5 | −0.9 | −0.7 | 0.2 |

당할 수 있다는 뜻이다. 한편 관행적인 고도보정방법에 의해 동두천기상대의 공식 최저기온을 공간내삽하여 옥산리 과원의 기온을 추정한 결과 이 기간 중 단 3일만 3°C 이하로 내려갔다. 즉 관행적인 기온내삽법은 기상관서의 예보값과 별 차이가 없거나 오히려 더 못할 수도 있다. 반면 SHU 규모에서 Chung *et al.* (2003)의 냉기모형을 적용하여 계산한 최저기온은 실측치와 거의 비슷하였을 뿐 아니라 7일 모두 정확히 3°C 이하의 서리피해 위험을 예측할 수 있었다(Table 3).

## IV. 결 론

복사냉각 야간의 찬 공기흐름을 모의하여 이를 최저기온 추정과정에 이용하는 Chung *et al.*(2002)의 방법은 당초 모형개발이 이루어졌던 경남 하동지역 뿐 아니라 경기 연천지역에서도 일 최저기온 추정에 탁월한 개선효과를 보였다. 냉기집적의 계산을 위한 공간규모 즉 집수역의 크기에 따른 개선효과를 검토한 결과 평탄지의 경우 집수역의 크기와 무관하였지만, 복잡지형의 경우 기존의 수문단위를 하천차수 분석에 의해 세분한 소수역이 가장 좋은 결과를 보였다. 이 결과에 따르면 평탄지의 경우 기존 840개 수문단위별로 냉기집적량을 계산하여 최저기온 보정에 이용하는 것이 계산과정의 시간과 노력 면에서 가장 효율적이다. 하지만 산간-중산간지로 이루어진 복잡지형에서는 더욱 세분화된 소수역 단위로 냉기보정을 실시해야 한다. 지역별 서리경보시스템 구축에 이 결과를 충분히 고려한다면 실용수준의 신뢰도를 확보할 수 있을 것이다. 결론적으로 냉기보정을 토대로 하는 최저기온 내삽모형이 과원지대 서리경보시스템의 핵심요소가 될 수 있음이 본 연구를 통해 입증되었다.

## 감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 농업특정연구사업 (과제명: 포도동해 발생의 지형기후학적 해석연구) 지원으로 수행되었음.

## 인용문헌

Bootsma, A., 1976: Estimating minimum temperature and climatological freeze risk variations in hilly terrain. *Agricultural Meteorology* **16**, 425-443.

Chmielewski, F-M., A. Muller, and E. Bruns, 2004: Climate change and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. *Agricultural and Forest Meteorology* **121**, 69-78.

Chung, U., H. H. Seo, K. H. Hwang, B. S. Hwang, J. I. Yun, 2002: Minimum temperature mapping in complex terrain considering cold air drainage. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**, 133-140. (In Korean with English abstract).

Chung, U., H. C. Seo, J. I. Yun, and K. H. Lee, 2003: An optimum scale for topoclimatic interpolation of daily minimum temperature in complex terrain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**, 261-265 (In Korean with English abstract).

Kim, S. K., J. S. Park, E. S. Lee, J. H. Jang, U. Chung, and J. I. Yun, 2004: Development and use of digital climate models in northern Gyunggi Province - I. Derivation of DCMs from historical climate data and local land surface features. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**, 49-60 (In Korean with English abstract).

Laughlin, G. P., and J. D. Kalma, 1987: Frost hazard assessment from local weather and terrain data. *Agricultural and Forest Meteorology* **40**, 1-16.

Lindkvist, L., T. Gustavsson, J. Bogren, 2000: A frost assessment method for mountainous areas. *Agricultural and Forest Meteorology* **102**, 51-67.